

Event Horizon Telescope による M87 Black Hole Shadow の撮像

池田 思朗 数理・推論研究系

As a member of the Event Horizon Telescope Collaboration



図 1: M87 中心のブラックホールシャドウの画像. (Image by the Event Horizon Telescope Collaboration))

2019年4月10日, Event Horizon Telescope collaboration による世界6箇所同時に記者会見が行われた. そこでは2017年4月に行われた観測のデータの最初の研究成果として M87 中心の Black Hole Shadow の画像が公開された(図1)[1, 2, 3, 4, 5, 6]. これまで6年ほどの間, データ科学の立場から EHT のプロジェクトに関わってきた.

EHTでは複数の方法で画像の再構成を行い, 再構成画像から主観性を除く努力を行った. 我々はMITの秋山和徳氏を中心として画像再構成法のひとつ SMILI を開発した[7]. SMILI ではスパースモデリングに基づく方法を用いて画像の再構成を行う.

電波干渉計では, 画像を空間的に2次元フーリエ変換したものが観測される. 以下のような観測モデルとなる.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v} &= \mathcal{F}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{n}, \quad \boldsymbol{v} \in \mathbb{C}^M, \boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^N, \boldsymbol{n} \in \mathbb{C}^N, \boldsymbol{x} \geq 0, \\ \mathcal{F} &: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{C}^M. \end{aligned} \quad (1)$$

\boldsymbol{x} が天球面上の画像, \boldsymbol{n} はノイズ, 観測される \boldsymbol{v} はビジビリティ(Visibility)と呼ばれる. \mathcal{F} は理想的には線形の フーリエ変換となるが, EHTの観測では非常に離れた望遠鏡でとられた 1.3mm の電波の信号を扱っているために非線形な関数となる. EHTでは, 電波望遠鏡の局の数がすくないため, 周波数領域のサンプリングは十分ではない($2M < N$). このため, 画像再構成の問題は不良設定の逆問題となる.

画像を求めるためには上の式で得られた \boldsymbol{v} から \boldsymbol{x} を求める必要がある. ビジビリティの点の数が十分ではないため, 何らかの方法によって足りない条件を補って解決しなければならない. そこで, 以下のように制約付きの最適化問題として画像を求めることにする.

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \arg \min_{\boldsymbol{x}} \left[[\boldsymbol{v} \text{ と } \boldsymbol{x} \text{ との適合度}] + [\boldsymbol{x} \text{ の正則化}] \right]. \quad (2)$$

\boldsymbol{v} は \boldsymbol{x} をフーリエ変換したものなのだから, 理想的には第1項はビジビリティとモデル画像との2乗誤差となるが, EHTのデータでは \mathcal{F} の非線形性が大きく, そうはならない. SMILIでは電波干渉計特有のクロージャーと呼ばれる量によって第1項を定義した[4].

第2項の正則化項としては, これまでの我々の研究から, 天体画像の復元のためには, \boldsymbol{x} に0が多いという通常のスパース性と, 画像の輝度変化が少ないという Total Variation, さらに隣り合うピクセルの値との差が小さく, 画像は滑らかに変化するという Total Squared Variation という正則化が有効であることが分かっている. SMILI ではこれらを用いて画像再構成を実現した.

SMILIはLASSOを解く方法ではない. EHTのイメージングでは LASSO よりも複雑な問題を解くことによってはじめて図1の画像を得ることができた. 今後は偏光イメージングや動画イメージング, SgrA*の解析など EHT のプロジェクトはまだ続いていく.

参考文献

- [1] K. Akiyama, et al. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *ApJL*, 875(1):L1, 2019.
- [2] K. Akiyama, et al. First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation. *ApJL*, 875(1):L2, 2019.
- [3] K. Akiyama, et al. First M87 Event Horizon Telescope Results. III. Data Processing and Calibration. *ApJL*, 875(1):L3, 2019.
- [4] K. Akiyama, et al. First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole. *ApJL*, 875(1):L4, 2019.
- [5] K. Akiyama, et al. First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring. *ApJL*, 875(1):L5, 2019.
- [6] K. Akiyama, et al. First M87 Event Horizon Telescope Results. VI. The Shadow and Mass of the Central Black Hole. *ApJL*, 875(1):L6, 2019.
- [7] K. Akiyama, et al. SMILI: Sparse Modeling Imaging Library for Interferometry Astrophysics Source Code Library, ascl:1904.005, 2019.

